

## IMPLICACIONES DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE ALGUNOS CONCEPTOS EN LA ENSEÑANZA DE LA RELATIVIDAD

H. Pérez <sup>(1)</sup> y J. Solbes <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>IES de Sedaví, Valencia. <sup>(2)</sup>IES J. Rodrigo Botet, Manises, Valencia.

[Jordi.Solbes@uv.es](mailto:Jordi.Solbes@uv.es)

[Recibido en Marzo de 2006, aceptado en Mayo de 2006]

### RESUMEN <sup>(Inglés)</sup>

*La relatividad es una parte importante de la física moderna. En este artículo se analiza el debate en torno a la utilización de la historia de la ciencia para orientar la didáctica de la relatividad en la enseñanza secundaria. Se repasa la evolución histórica de algunos conceptos clave de la relatividad especial y se muestra su implicación en la enseñanza-aprendizaje*

**Palabras clave:** enseñanza-aprendizaje; relatividad; historia de la ciencia.

### INTRODUCCIÓN

Acabamos de celebrar el pasado año 2005 el Año Mundial de la Física. Esta asignación conmemora el centenario del importante artículo de Einstein sobre la relatividad especial, así como alguno de sus trabajos más creativos como el referente al efecto fotoeléctrico o el dedicado al movimiento browniano, publicados en *su año milagroso*.

Estas efemérides tienen el mérito de suscitar reflexiones acerca de la historia de la ciencia y, desde la perspectiva didáctica, de su utilidad para la enseñanza-aprendizaje de las ciencias. El propósito de este artículo es revisar brevemente el debate acerca de su uso para este propósito y apuntar algunas notas acerca de la evolución histórica de los conceptos que inciden en la enseñanza de la relatividad especial.

### EL DEBATE ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA Y LA RELATIVIDAD

Es objeto de debate la conveniencia de la utilización de la historia de la física en la enseñanza y la extensión de este uso, en una doble vertiente: como objeto de estudio *per se* y como referente didáctico para comprender la evolución conceptual y favorecer la formación física del estudiante y, así mismo, para desarrollar actitudes y valores acerca de la física.

En la primera perspectiva se la considera como un contenido curricular por su valor cultural y formativo. Se considera de interés la profundización en los mecanismos de creación de conocimiento físico el papel que desempeña en la sociedad y su interacción con la ciencia y la técnica. Sin embargo, es preciso destacar que el campo de estudio de la historia de la física no es el de la propia física. No se trata por ello de impartir una asignatura de historia de la física sino, por el contrario, aprovecharla para lograr un aprendizaje significativo de la física, a los cuales la historia de la ciencia puede contribuir eficazmente. La extensión y alcance de su uso en la enseñanza debe por tanto matizarse y podemos asumir los razonamientos de Sánchez Ron (1988) acerca de la utilidad de su papel en la comprensión de la propia ciencia, quien indica: *"Sobre este punto auténticamente crucial, diré de entrada que no está demostrado en absoluto y que, además, en mi opinión, es tomado en general y sin más falso"*. El mismo autor aboga más adelante con rotundidad por el uso controlado, simplificado y encauzado de la historia de la ciencia en la enseñanza de la misma.

La simplificación es necesaria por la propia complejidad de la historia de la ciencia, sin embargo, ha de respetar tanto la lógica interna del quehacer científico, como presentar una imagen de la ciencia no distorsionada. Esta advertencia pretende salir al paso de un uso limitado a la exposición de anécdotas, modelos escogidos, datos biográficos de genios que encarnan en exclusiva el progreso científico, etc.

En la segunda perspectiva la práctica en la enseñanza secundaria se ha venido caracterizando (Solbes y Traver, 1996) por ignorar *"los aspectos históricos en la imagen de la física y química que se transmite, y cuando se utilizan se introducen tergiversaciones o errores históricos"*. Así mismo apuntan razones para su utilización en la enseñanza, entre las que podemos destacar las siguientes.

Puede ayudar a superar visiones sesgadas de la ciencia: visiones *empiristas y ateóricas, rígidas* (metodológicamente algorítmicas), *aproblemáticas, ahistóricas, acumulativas lineales, elitistas etc.* y especialmente una concepción de la ciencia *descontextualizada y socialmente neutra*, sin atender a lo que sabemos de las complejas relaciones CTS (Gil, 1993). Incluso, la historia de la ciencia puede contribuir a que la enseñanza de la física y la química adquiriera un componente crítico con las imágenes tópicas y deformadas de la ciencia, que son difundidas en ocasiones por los propios textos.

Especialmente interesante es la posibilidad que brinda de profundizar en su carácter hipotético, tentativo, las limitaciones de sus teorías, los problemas pendientes de solución. *"Se evitan así visiones dogmáticas"* y se muestra la aventura creativa de su construcción y la forma en que se acumula conocimiento.

Un factor relevante es el mostrar la ciencia como una construcción colectiva humana, huyendo de la visión elitista antes citada, que la considera una sucesión de obras debidas a genios soslayando el papel de la colectividad en su progreso. Pero no cabe plantear al científico encerrado en "una torre de marfil" ni tampoco caer en una visión "excesivamente sociológica de la ciencia".

Un aspecto adicional de relevancia es el desconocimiento de las contribuciones realizadas en nuestro país, y el carácter y calidad de las mismas reflexionando

críticamente en las circunstancias históricas en que se ha desenvuelto la ciencia en nuestro país (López Piñero, 1982; Glick, 1986; Sánchez Ron, 1999).

Es igualmente de una gran importancia el estudio de la vinculación con la sociedad, explorar las repercusiones sociales de los conocimientos científicos tanto en la cultura como en los desarrollos tecnológicos. No debe olvidarse que la enseñanza secundaria, incluso el bachillerato, posee un carácter formativo intrínseco, de ciudadanos y su interés no debe limitarse a hechos y teorías acabadas.

Algunos autores consideran que la historia de la ciencia favorece una adecuada comprensión de los conceptos físicos. Las razones para sostenerlo son múltiples, citemos en primer lugar la aportación de diversos autores quienes han investigado acerca de los paralelismos existentes entre las diferentes metafísicas, ideas, conceptos, teorías, etc. mantenidos a lo largo de su evolución y las ideas sostenidas por los alumnos (McDermott, 1984; Matthews, 1991). Otros autores han profundizado en la búsqueda de vinculaciones y paralelismos en el proceso histórico del nacimiento y aceptación de las teorías, poniéndolas en conexión con el proceso de cambio conceptual de los alumnos y la didáctica de la materia (Driver et al, 1992; Saltiel y Viennot, 1985).

Si bien estas aportaciones han sido cuestionadas, aún se puede extraer de la historia de la ciencia información útil acerca de estas ideas. Aspectos similares se han constatado, efectivamente, en trabajos de innovación educativa, (Martín y Solbes, 1991; Furió y Guisasola, 1998) sobre los conceptos de carga y campo eléctrico. Estos autores constataron la existencia de nociones de los estudiantes próximas al *sentido común*, junto con dificultades en conceptos abstractos similares a los problemas epistemológicos que tuvo que superar la ciencia en la construcción de sus teorías. Detectaron interacciones complejas entre preconcepciones y conocimientos científicos.

Es necesaria igualmente en el diseño de la enseñanza por el profesor, por cuanto favorece la selección de contenidos básicos, y es esencial en la elaboración de las situaciones problemáticas simplificadas que se precisan en la enseñanza. Permite extraer de dicha historia los problemas significativos (Gil y otros, 1991).

Una amplia investigación llevada a cabo por Solbes y Traver (2003) mediante cuestionarios, análisis de textos, observación directa en aula, etc. ha puesto de manifiesto la mejora significativa tanto en la imagen de la ciencia como en el desarrollo de actitudes positivas que se puede conseguir en este campo con "*un tratamiento mínimamente detenido de algunos aspectos históricos*" encuadrados en el proceso de enseñanza.

En la última vertiente, se valora lo que de positivo tiene su uso para propiciar el desarrollo de actitudes positivas hacia la ciencia y su aprendizaje, favorecer la participación de los estudiantes y mejorar el clima del aula. Los contenidos actitudinales son por lo general ignorados en la enseñanza (Izquierdo, 1994), aunque los valores, al menos implícitamente, están presentes (Solbes, 1999). La utilización de la historia de la ciencia en general, y de la física en particular, puede ayudar al estudio de estos factores: responsabilidad social de los descubrimientos científicos, finalidad del conocimiento, neutralidad de la ciencia, etc.

Recapitulando, la comprensión por parte del docente y su uso, parcial, encauzado y dirigido con los estudiantes, proporciona una poderosa herramienta didáctica. También se ha mantenido de forma argumentada su papel metacognitivo (Campanario, 2000).

Que este tipo de razonamientos han estado, más o menos explícitos, en todos los estudiosos de la enseñanza, lo denota la presencia tradicional de la faceta histórica en los manuales de la disciplina. A menudo desde orientaciones epistemológicas muy criticables, ya superadas. Un argumento adicional de fácil constatación es la persistente referencia al debate histórico en las publicaciones sobre la didáctica de la relatividad. E incluso al significado físico de los conceptos como en el debate sobre el concepto de masa relativista que veremos más adelante.

### **PERSPECTIVA HISTÓRICA SOBRE ALGUNOS CONCEPTOS RELATIVISTAS**

A continuación se examina, en el marco particular de la Historia de la Ciencia, la evolución histórica, y los atributos, de los conceptos de espacio y tiempo, así como del principio de relatividad. Se efectuará trazando, a grandes rasgos, las etapas fundamentales de los grandes sistemas de pensamiento.

#### **Las concepciones anteriores a la revolución científica.**

Fue la civilización griega la primera que dio el paso a la creación consciente de sistemas de pensamiento que presentaban una visión general del mundo, la naturaleza, el hombre, la vida y el propio pensamiento. Ellos fueron los primeros en indagar sistemáticamente y crear conceptos claves para nuestro tema: continuidad, discontinuidad, materia y su estructura, el infinito, la simetría e interrogarse sobre los fundamentos del tiempo, las propiedades de los cuerpos o la configuración del mundo y sus límites. Esta concepción del universo dotado de regularidades, leyes asequibles al descubrimiento por el pensamiento humano, es el germen de la ciencia y constituye una de sus más importantes aportaciones.

La geometría euclídea, fuente de todo el razonamiento geométrico hasta el S. XIX y uno de sus más importantes frutos, describe con gran precisión de forma *aproximada* el mundo. La ruptura con ella no se produjo de manera efectiva en la Física hasta la Teoría General de la Relatividad del S. XX. Los *Elementos* fueron publicados alrededor del 300 aC y han constituido uno de los textos más influyentes de la ciencia.

En la tradición occidental las concepciones helénicas, que dominaron el pensamiento antiguo, se revitalizaron y difundieron en la baja edad media (S. XI a S. XIV). Podemos fijar dos corrientes principales, asignándoselas a Platón y Aristóteles, y que suponen visiones diferentes acerca del mundo físico. Desarrollando la línea marcada por el *Timeo* de Platón las escuelas medievales del norte de Francia, p. ej. Thierry de Chartres (muerto hacia 1050) reflexionaban acerca del espacio y se pronunciaban por la inexistencia de vacío, consideraban el espacio como un *plenum*, esto es que estaba lleno, lo que a su vez les planteaba el problema del movimiento. Para ellos “el movimiento podía darse desplazando un cuerpo a su vecino y ocupando su lugar en una especie de torbellino” (Crombie, 1959).

La explicación aristotélica, en cambio, no aceptaba la teoría platónica de que las formas de las cosas físicas existían separadas de ellas, ni atribuía el cambio por la aspiración de las cosas a sus arquetipos ideales. No veía ninguna razón para que no hubiera límite en la división de los cuerpos físicos, el espacio, tiempo o de cualquier *continuum*. Para él la concepción del vacío, representaba el *no ser*, frente al ser de la materia, y por tanto aparecía como insostenible. Introducía entre el ser y no-ser la potenciabilidad y asignaba el cambio a la actualización de la misma por una causa. El lugar natural de las sustancias marcaba la tendencia natural de cambio, conforme a un esquema cosmológico.

El cosmos aristotélico, era una amplia esfera, pero finita, con su centro en la Tierra. Y con un sistema de esferas, envolturas concéntricas donde se ubicaban de forma natural los elementos y limitada por la esfera de las estrellas fijas. Los cuerpos orientaban cada uno sus movimientos hacia el lugar natural que les correspondía en razón de su composición, y existía una diferencia cualitativa entre los movimientos de un cuerpo determinado según las diversas direcciones. El movimiento de las esferas se realizaba respecto a un punto fijo, el centro de la Tierra en cuanto centro del Universo. La fuente original del movimiento era, junto con las esferas celestes el *primum movens*, que se movía a sí mismo; el movimiento circular uniforme era la máxima aspiración de un cuerpo físico a ese estado. La concepción del espacio que se deriva de esta cosmología es la de un espacio limitado, finito, no isótropo, con simetría esférica, etc.

En lo que respecta al tiempo, la posición aristotélica se corresponde con la que podemos atribuir al "sentido común" en cuanto a tiempo orgánico, progresivo, irreversible, de carácter universal y absoluto. Sin embargo, en cuanto a la construcción conceptual podemos reflejar cierta perplejidad en la concepción antigua, baste el ejemplo de San Agustín (S. V) que se interroga "¿Qué es, pues, el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé; si deseo explicarlo a quien me lo pregunta, no lo sé" (citado por Bertrand Russell en *El conocimiento humano* 1983), mostrando así las dificultades de construir un tiempo abstracto. Los relojes antiguos estaban basados en fenómenos astronómicos, o en desplazamiento de fluidos o granos, y no fue hasta finales del siglo XIII en que se inventó el reloj mecánico. En él las manecillas traducían el tiempo a unidades de espacio sobre la esfera, con ello se iniciaba el camino hacia un tiempo abstracto, matemático, de unidades sobre una escala, que pertenecía al mundo de la ciencia.

También el espacio sufrió la abstracción durante la Edad Media, de los mapas simbólicos y jerárquicos en cuadros, se pasó a la perspectiva y en los mapas cartográficos, a la posición en sistemas abstractos de coordenadas de latitud y longitud.

Santo Tomás de Aquino (nac.1225, +1274) fijó la imagen del mundo cristiano en términos muy próximos a los aristotélicos, soslayando, reinterpretando y ajustando a *Las Escrituras* las obras antiguas que se iban incorporando al acervo occidental. Sin embargo, la crítica escolástica a Aristóteles, socavó gran parte de sus supuestos lógicos. En el S. XIV, Nicolás de Oresme, criticó el principio de la unicidad de la Tierra, la existencia de un centro único natural del espacio. Según la teoría Oresmiana, el

*movimiento natural de un cuerpo se halla gobernado, no por la posición que ocupa en un espacio aristotélico absoluto, sino por su posición relativa a otros fragmentos de materia.* (Kuhn, 1978). Mas adelante Kuhn lo cita en la siguiente forma que anticipa claramente los argumentos copernicanos basados en la relatividad óptica.

*"Parto del supuesto de que el movimiento local sólo puede ser percibido cuando un cuerpo altera su posición respecto a otro. Por tal razón, un hombre situado sobre un navío a que se mueva con uniformidad, rápida o lentamente, y que tan sólo puede ver otro navío b que se mueva del mismo modo que a... Si a está en reposo y b en movimiento, creerá que b se mueve; pero si es a quien está en movimiento, seguirá creyendo, como en el caso anterior, que a está en reposo y b es el que se mueve..."*

Oresme termina argumentando sólidamente la posibilidad de movimiento de la Tierra. Kuhn (1978), en el texto citado, contrasta la diferencia con Copérnico y Galileo señalando el salto de estos de un *podría moverse*, planteado como especulación académica a un "se mueve" realmente lo que trastoca la concepción antigua del espacio centrada en la Tierra.

### **La revolución científica y la posición newtoniana.**

Tras el inicio de la revolución copernicana, que podemos situar hacia en 1543 con la publicación de su *De revolutionibus*, y los pasos de hombres como Galileo, se abrió el camino hacia la superación de las concepciones antiguas. Entre las figuras clave con respecto al tema que nos ocupa, destaca el papel de Descartes (1596 - 1649).

La aportación de Descartes a la construcción del concepto físico de espacio es muy importante. Para los griegos existían los cuerpos, los entes matemáticos o físicos, y su posición o relación entre ellos, pero no la noción de espacio como tal, el espacio asume tan sólo un papel cualitativo. Con la matematización cartesiana del espacio se convierte en sujeto del pensamiento físico.

*"...[La] Ciencia ha sido capaz de avanzar sin disponer del concepto de espacio como tal: fueron suficientes para sus necesidades las formas corpóreas ideales...Por otra parte, el espacio como conjunto, tal como fuera concebido por Descartes constituía una necesidad absoluta para la física newtoniana" (Einstein, 1986).*

Descartes identifica espacio y materia, y prescinde del concepto de fuerza, la acción de un cuerpo sobre otro se realiza por contacto en un mar de materia e identifica materia y extensión. No considera, por tanto, el concepto de vacío y reduce la causalidad física a la conservación del movimiento. Todo el movimiento aparece por tanto como relativo. Leibniz desarrolló estas ideas e introdujo las fuerzas para explicar la impenetrabilidad de la materia y las distribuciones de fuerzas, estableciendo una corriente de pensamiento alimentada por los Bernouilli, Euler, Kant...

Bunge (1983) resume las diversas concepciones del espacio y tiempo considerando tres modelos: modelo de materia prima, modelo relacional y modelo de recipiente. El modelo cartesiano considera la materia como vórtices, puntos especiales del espacio,

esta línea de pensamiento dará frutos conceptuales en la teoría de campos de Faraday, y en el siglo XX.

El modelo relacional en el que podemos encuadrar a Leibniz atribuye los conceptos de espacio y tiempo a las relaciones y ordenaciones de las posiciones relativas entre objetos y sucesos. En esta línea se sitúan parte de las críticas de Mach, a finales del XIX, sobre los presupuestos básicos newtonianos.

La concepción de Newton es prototípica del modelo recipiente. Según esta el mundo está constituido por corpúsculos sólidos, extensos y espacio vacío. Sin embargo se maneja una tercera entidad, la fuerza, cada partícula es capaz de actuar "a distancia" y ejercer fuerzas directamente sobre otros cuerpos del universo. El universo newtoniano es infinito e ilimitado.

Al espacio se le atribuyen las propiedades de: homogeneidad (todos los puntos presentan las mismas propiedades geométricas), isotropía (todas las direcciones son equivalentes), universalidad (desde cualquier sistema de referencia se maneja una misma métrica), el tiempo aparece como continuo, homogéneo, universal (el tiempo transcurre igual en cualquier sistema de referencia, o sea los relojes una vez sincronizados marcan siempre el mismo tiempo) etc. En el esolío de los *Principia* (1687) es especialmente claro:

*I.- El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye de una manera ecuable y sin relación alguna con nada externo...*

*II.- El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece siempre similar e inmóvil... (Newton, 1972)*

La presentación axiomática del espacio y el tiempo esconde los problemas lógicos que pondrán de manifiesto más adelante, de forma clara, Mach, Poincaré, y finalmente Einstein al razonar sobre las operaciones que los hacen operativos en la física. Los problemas se dan en la introducción de un tiempo objetivo local, el concepto de reloj y la generalización a todo el espacio del tiempo objetivo. La posición recogida de los enunciados de Newton, que no la de su práctica como físico, le hacen señalar a Holton (1979): *"Hoy en día, afirmaciones como éstas, sin ningún significado operacional inherente, se las llama, a veces sin significado, un término quizá algo drástico pero preciso en este sentido limitado"*.

La ecuación fundamental de la mecánica hace intervenir los conceptos de espacio, tiempo, sistema de referencia, fuerza y masa. La ley de la inercia precisa de un significado claro de términos como movimiento uniforme, reposo, movimiento en línea recta. Remite al problema del sistema de referencia con respecto al cual los cuerpos estén en línea recta, recorriendo en tiempos iguales espacios iguales, y por tanto plantea el problema de lo que sean el espacio y el tiempo. En el corolario quinto a los axiomas, o leyes del movimiento, se recoge la relatividad cinemática:

*"Los movimientos relativos de cuerpos incluidos en un determinado espacio son los mismos, tanto en el caso de que ese espacio esté en reposo como en el supuesto de que se mueva uniformemente en línea recta, sin movimiento circular" (Newton, 1972).*

El principio de relatividad, ligado al concepto de sistema de referencia inercial, permite la construcción coherente de la mecánica. Y refleja el hecho de que, desde el punto de vista mecánico, la traslación uniforme, como un todo del conjunto del sistema material, es indistinguible del movimiento absoluto.

Newton introduce un Sistema de Referencia Inercial como un miembro del conjunto de sistemas que se mueve con MRU respecto a un SR absoluto. La vinculación con el principio de inercia es inmediata, en tanto que un cuerpo en reposo permanece siempre en reposo o en MRU. Esta afirmación supone una progresión sobre la posición de Galileo, no sólo en lo formal, pues la inercia por la que abogaba Galileo se seguía la forma circular en torno a la Tierra.

Al igual que la ley de la inversa del cuadrado, la verosimilitud de la ley de la inercia y la de las fuerzas centrales, se basa en el carácter homogéneo e isótropo del espacio, y la caracterización del movimiento y reposo como clases de "estados".

El propio Newton era más consciente que sus sucesores de las dificultades inherentes al concepto de espacio absoluto, entidad que sin aparecer empíricamente en las leyes mecánicas referidas a partículas y masas juega un papel importante en la teoría. Así como de las dificultades lógicas de la "acción a distancia". Entre las cartas a uno de sus alumnos podemos encontrar este famoso fragmento (tomado de Berkson, 1985).

*"La idea de que la gravedad es innata, inherente y esencial a la materia, de forma que un cuerpo puede actuar sobre otro a distancia sin que medie nada que transporte sus acciones y sus fuerzas, me parece tan absurdo, que nadie que posea en asuntos filosóficos una facultad competente de pensar puede caer en ella..."*

### **Las aportaciones del XVIII.**

Lo fructífero del programa newtoniano, en su desarrollo práctico, fue dando lugar a una habituación de los físicos a su sistema de pensamiento, obviando sus inconsistencias lógicas. Podemos decir que sus seguidores eran menos conscientes de sus dificultades que el propio Newton.

A lo largo del XVIII fue clarificándose, extendiéndose y formalizándose el edificio conceptual de la mecánica. Un trabajo a menudo minusvalorado, muy bien estudiado por Truesdell (1975), quien indica a propósito de la relatividad:

*"Hoy en día el principio de invarianza de Galileo es bien conocido, pero durante el S. XVIII se presenta más como una intuición que como una afirmación explícita. El descubrimiento de las propiedades de invarianza de la mecánica nació del estudio de problemas concretos más que de formulaciones generales".* Atribuye a los trabajos de Daniel Bernouilli, Euler y Clairaut hacia 1740 su formulación, y afirma: *"En 1745 Clairault expuso con gran claridad lo que hoy conocemos como el principio del movimiento relativo, según el cual un cuerpo observado desde un sistema de referencia no inercial experimenta una fuerza 'aparente' que es igual a la aceleración cambiada de signo".*

En esta tarea Euler es el primero en usar del lenguaje algebraico y diferencial para presentar la mecánica, y a él se debe por ejemplo la formulación matemática de la



segunda ley en forma analítica moderna, corrientemente atribuida a Newton. Euler, muy influido por Leibniz, no deja de mostrar, no obstante, una versión ortodoxa de lo que constituía las nociones de espacio y tiempo. Así se muestra en sus célebres *Reflexiones sobre el espacio la fuerza y la materia* (Euler, 1985).

El éxito del modelo newtoniano lo impuso, tanto como programa de investigación, como sustrato básico de los desarrollos de otras ramas. Una importante línea de trabajo buscó la extensión de la cosmovisión Newtoniana a otros ámbitos: partículas materiales y fluidos diversos y, junto al ascenso del atomismo, será un tema básico del XIX.

La filosofía de Kant (1724-1804), y sus continuadores, terminará dominando el final de este periodo y gran parte del XIX. Consideraba al espacio y al tiempo no tanto como realidades físicas sino como "categorías" de la mente humana, que esta utilizaba para la ordenación del mundo. En ese sentido los atributos clásicos del espacio, con su naturaleza euclídea, y el tiempo se consideran las únicas concepciones naturales evidentes.

La investigación matemática desarrollaría el siglo siguiente las geometrías no euclídeas, pero en sus creadores alentaba el espíritu de la creación teórica sin vinculación con la realidad física.

### **Los programas de investigación del XIX.**

Dos grandes programas, con visiones muy diferentes de la naturaleza física orientaron el desarrollo de la física en este siglo. Uno era la continuación lógica en el mundo de la electricidad y el magnetismo del programa newtoniano. El otro, impulsado por Faraday, y continuado principalmente por Maxwell, introdujo y desarrolló el concepto de campo. Las ideas de Faraday se alejaban de una forma muy clara del programa newtoniano y modificaban tanto la naturaleza del espacio físico como la propia concepción de materia. Maxwell, sin embargo, no dejó de tomar como referente las relaciones de hipotéticas masas en interacción y mantuvo una distinción nítida entre materia y espacio. Finalmente, el propio Maxwell asumió como fundamental la propia estructura de las ecuaciones de campo, y a éste como la entidad esencial. Se produce así un desplazamiento de la realidad física desde las partículas materiales hacia campos continuos expresados como ecuaciones en derivadas parciales. Tal y como se recoge en su *"A Treatise on Electricity and Magnetism"* publicado en 1873.

Los seguidores del esquema newtoniano trabajaron arduamente en su extensión a la electricidad y el magnetismo. Realizaron importantes aportaciones en la estructuración matemática de las leyes, aunque en el camino tuvieron que alterar supuestos importantes tales como la inclusión de acciones no centrales, etc. Sin embargo la quiebra del concepto de acción a distancia, derivada de la existencia de un tiempo de propagación de las perturbaciones, representó un importantísimo punto de contradicción con la cosmovisión newtoniana.

Por otra parte, el desarrollo de la óptica había refundado ésta sobre la base de ondas transversales que precisaban de un medio de propagación: el éter. Conforme a las nuevas necesidades del desarrollo del electromagnetismo se intentó interpretar el

campo como un estado tensional mecánico del éter. La introducción de este concepto está ligada a la existencia de una concepción del espacio como recipiente de los fenómenos físicos, e independiente de ellos. La incapacidad de asignar al espacio mismo una función activa obligó a la introducción de un sustrato material, capaz de vibrar y soportar la propagación de los campos: el éter.

Esta dualidad sintética de campos y partículas, como realidades físicas últimas, ha estado muy presente en la física, el propio Einstein intentó sin conseguirlo plenamente seguir su programa de geometrización y unificación profunda que se saldaron finalmente con un fracaso. Pese a ello, esa tendencia hacia lo fundamental y hacia la unidad se encuentra hoy presente en la física más actual.

El poco éxito de los modelos mecánicos del éter dio paso a un uso meramente funcional. Con Hertz, hacia 1885 aparece la idea de un éter desvinculado a cualquier referente mecánico.

El problema del estado dinámico del éter se situaba en el centro de la explicación de los fenómenos ópticos: de la aberración estelar (la Tierra no arrastra el éter, según formula Young en 1804), al coeficiente de arrastre parcial (Fizeau en 1851 para los medios en movimiento), a los experimentos de detección del movimiento de la Tierra en el éter (como los experimentos de Michelson de 1881, y con Morley en 1886).

A esto se sumó la crítica de los fundamentos de la mecánica, realizada entre otros por Mach, quien puso de manifiesto las dificultades inherentes al concepto de espacio absoluto. Alcanzó gran impacto su célebre crítica al experimento crucial de Newton del cubo giratorio en que apoyaba la detección experimental del mismo. El rechazo a este absoluto conduce, en palabras de Einstein (1986): *"Si se considera el movimiento desde un punto de vista descriptivo y no desde un punto de vista causal, sólo existe como movimiento relativo de las cosas, las unas con respecto a las otras. Pero la aceleración que aparece en las ecuaciones de Newton es incomprensible si se parte del concepto de movimiento relativo. Esto obligó a Newton a inventar un espacio físico con relación al cual parece que existe la aceleración"*.

Para Mach no existía realidad sin posibilidad de definición operativa. Por ello los conceptos absolutos newtonianos eran pura imaginación. Escribía:

*"Todas las masas, todas las velocidades, y por tanto todas las fuerzas son relativas. Con nuestros sentidos no podemos distinguir ninguna diferencia entre lo relativo y lo absoluto. Por otra parte no hay razón alguna para que admitamos dicha distinción, pues no trae ninguna ventaja, ni teórica ni de otro tipo"* (citado por Selleri, 1997). A continuación rebate el famoso experimento del cubo de Newton. Las ideas de Mach adquieren fortaleza si se reflexiona sobre el hecho de que la construcción real de la física no precisó de la detección del espacio absoluto y que las relaciones que se manejan son relaciones funcionales entre magnitudes, Mach otorgaba relevancia precisamente a las magnitudes primarias que causaban "sensaciones".

Las ideas de Mach resultaron finalmente demasiado limitadas para la Física, le conducían a cuestionar la noción de átomo, y finalmente a oponerse a la relatividad general. Sin embargo sus ideas y su crítica a los fundamentos de la mecánica sirvieron de acicate, sin duda, a la formulación de la Teoría de la Relatividad de Einstein

### Las aportaciones de Poincaré y Lorentz

Lorentz modifica sustancialmente el concepto de éter, le libera de cualquier referencia mecánica y afirma la participación de la materia en los fenómenos electromagnéticos mediante la existencia de partículas elementales cargadas. El trabajo de Lorentz da al campo y a las partículas eléctricas, el estatus de elementos de la realidad física.

A lo largo de sus trabajos Lorentz formuló diferentes versiones en su reelaboración de la electrodinámica. Para explicar experimento de Michelson Morley en 1892, según el cual la velocidad de propagación de la luz obtenida en el experimento resultaba independiente del movimiento del observador, proponía la hipótesis ad-hoc de la contracción de los cuerpos en movimiento por la alteración de las fuerzas intermoleculares originada por la influencia del movimiento en el seno del éter. De forma independiente a la propuesta análoga un poco anterior de Fitzgerald de 1889. La medida de la velocidad resultaría así afectada por la modificación del instrumento de medida, en una suerte de compensación que salvaba así la composición de velocidades galileana. Esencial a todas las versiones de la teoría era la existencia de un éter inmóvil que conducía a la incompatibilidad de fondo con las leyes newtonianas. Sin embargo también la introducción de las partículas eléctricas impedía la construcción de un modelo de realidad basado exclusivamente en campos.

En 1900 Poincaré señala que *"si la Teoría de Lorentz es correcta habría que abandonar probablemente algunos principios de la mecánica newtoniana. Y advierte que la teoría del electrón no sólo viola el principio de acción y reacción sino la conservación del momento* (Berkson, 1981).

Estas formulaciones críticas motivaron sucesivos refinamientos y ajustes en la teoría por parte de Lorentz, quien en 1904 presentó la modificación de la Teoría del Electrón que presentaba la construcción de las ecuaciones que hoy llamamos de transformación de Lorentz. Las ecuaciones de transformación, las mismas que serán obtenidas en el trabajo de Einstein de 1905 sobre bases diferentes, aparecían tal y como señala Holton (1979) de forma un tanto forzada y con un análisis conceptual muy diferente al relativista: el tiempo local, aparecía como un artificio matemático sin significación física. La explicación de la contracción hacía intervenir el éter en tanto el movimiento absoluto del cuerpo la ocasionaba. La incapacidad de detectar variaciones en la velocidad de la luz no se basaba en un rechazo a los supuestos básicos de la transformación de Galileo sino a mecanismos de compensación que hacía indetectable la modificación.

A Poincaré puede atribuirse, sin duda, un papel importante en la creación de conceptos básicos de la relatividad especial. En sus textos de comienzos de siglo, 1905, y sobre todo el famoso de 1906 (*Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*) reafirmó la importancia del principio de relatividad, reafirmando su compatibilidad con la Teoría electromagnética y las propiedades matemáticas de la transformación de Lorentz. Trató sobre aspectos tales como simultaneidad, formación de los conceptos de espacio, tiempo, etc.

Es claro que, a estas alturas, la Física estaba muy lejos de las concepciones clásicas. Sin embargo, todavía no se efectuaba una modificación conceptual en los conceptos

clásicos de espacio y tiempo y su consecuente aceptación por la comunidad científica. La insatisfacción crítica parecía cristalizar en la aceptación de la Teoría de Lorentz, que mantenía los presupuestos clásicos.

### **La publicación en 1905 de la Teoría especial de la relatividad de Einstein.**

El artículo de Einstein titulado "*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*" (Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento) publicado en la revista alemana *Annalen der Physik* sienta las bases de la relatividad especial, que se fundamenta en dos postulados: el principio de relatividad y el principio de invarianza de la velocidad de la luz. La teoría conduce al rechazo de la noción de éter, como innecesario para explicar los fenómenos electromagnéticos. De hecho, el rechazo al concepto de espacio absoluto arrastra al sistema privilegiado de éter en reposo y pone de manifiesto su carácter artificioso. Las bases de la teoría se toman de un análisis detallado de los presupuestos básicos y no parte propiamente de una base electromagnética. Tan sólo se retiene la constancia de la velocidad de la luz en coherencia con el principio de relatividad.

Este artículo apareció "*después de un prolongado período de reflexión sobre algunos aspectos de la teoría electromagnética de Maxwell, más que de cualquier referencia especial por su parte a los resultados del experimento de Michelson-Morley*" (Holton, 1979). Así como asimetrías en los fenómenos electromagnéticos. En concreto, señaló cómo la inducción electromagnética que aparece al mover un imán cerca de un conductor fijo, se explica mediante la aparición de un campo eléctrico en sus cercanías que origina la corriente en el conductor. Sin embargo si el que se mueve es el conductor la explicación implica una fuerza electromotriz en el conductor. Todo ello parece plantear la contradicción de dos vías de explicación de lo que es un único fenómeno, en lo que lo relevante es el movimiento relativo entre ambos. En suma formuló la necesidad de un principio de relatividad, que considera que en todos los sistemas de referencia inerciales han de ser válidas las mismas leyes de la física.

La concepción de tiempo y espacio cambia. El tiempo pierde su carácter absoluto, y su universalidad. El concepto de simultaneidad se modifica radicalmente y se establece el carácter invariable de todas las ecuaciones que expresan leyes fundamentales de la física. Se resuelve la incongruencia de que los sistemas Inerciales son indistinguibles por experimentos mecánicos internos pero sí parecían serlo mediante experimentos electromagnéticos. El ajuste se realiza asumiendo como válida tanto la teoría electromagnética como el principio de relatividad. La mecánica clásica permanece en el caso límite ordinario, de gran importancia práctica y teórica.

La alteración del espacio es importante, no es un ente abstracto, externo, en cuyo interior se mueven unos sistemas de referencia análogos a varillas rígidas. De hecho, cada sistema de referencia acarrea un espacio asociado con su correspondiente asignación de coordenadas. Más aún, surge el concepto de espacio-tiempo como un ente que resume ambos conceptos.

El principio de relatividad de Galileo supone ya una modificación importante de los conceptos de espacio y tiempo, cuya potencialidad no se desarrolla por el corsé que supone la noción de la existencia de un espacio absoluto, en efecto, podemos decir

que un cuerpo está en un punto en un instante, y en otro instante posterior, porque podemos admitir la persistencia del punto a lo largo del tiempo. Si *todos* los movimientos fuesen relativos y careciese de sentido el reposo absoluto ¿qué puntos mantienen su identidad y configuran el espacio? Se abriría la puerta a considerar infinitos espacios en pie de igualdad.

Si por ejemplo se supone una caja y su Sistema de Referencia asociado se puede establecer una métrica, y un tiempo común a todos los puntos, considerar y evaluar el espacio encerrado. Si otra caja se moviese en su interior, con un MRU, se puede considerar un flujo de espacio por sus caras al moverse, evaluándolo en cada instante considerando la simultaneidad de posición entre las caras. Si se evalúa desde el Sistema de Referencia de la otra, el estatus del espacio que define, es tan real como el otro asumiendo el principio de la relatividad con el rechazo del espacio absoluto. Si se da el paso de la relatividad especial, y se incorporan las modificaciones en la simultaneidad, los diferentes espacios no comparten ni siquiera aspectos tales como la evaluación del volumen del espacio que encierran ambas cajas.

La simultaneidad de los sucesos tan sólo guarda el carácter absoluto para sucesos que ocurren en el mismo lugar en igual tiempo. Y se divide el espacio-tiempo según el carácter de los intervalos en espaciales, temporales, o de género luz, clarificando los nuevos vínculos causales entre sucesos.

En cuanto a la formulación de las ecuaciones, los razonamientos efectuados por Einstein sobre bases cinemáticas y aplicados posteriormente al electromagnetismo, conducían a las ecuaciones, ya conocidas anteriormente de Lorentz-Fitzgerald sobre intervalos espaciales y temporales. Asimismo reproducían las ecuaciones de la teoría del electrón de Lorentz.

### **El rechazo a la teoría del electrón de Lorentz y la aceptación final de la Teoría de la Relatividad.**

Este proceso se realizó paralelamente con el desarrollo de la Teoría General, fue un proceso complejo (es famoso el comentario despectivo de Sommerfeld: *"Desaparecerá pronto de escena"*) y, salvo en Alemania, encontró importantes dificultades para su aceptación en otros países.

La situación era tal que *"durante varios años después de 1905, era muy común entre los físicos no distinguir entre la teoría de Maxwell - Lorentz y la relatividad de Einstein. Este fue el caso -durante algunos años- de Lorentz [...] En algún momento entre 1909 y 1915, año en que publicó su 'The Theory of Electrons', Lorentz cambió de opinión"* (Sánchez Ron, 1985), asumiendo lo que de innovador revestían las ideas de Einstein frente a su propia teoría. Esta posición de un líder clave es representativa de la aceptación generalizada de la comunidad científica.

Una mención especial merece la posición de Planck (1858-1947), que por su papel central en la física alemana de la época influyó de forma destacada en su aceptación, y contribuyó a ella tanto por su apoyo a la misma como con sus propias aportaciones. En 1906 ya introdujo la ecuación de movimiento relativista en forma  $\mathbf{F} = d(\gamma m \mathbf{v})/dt$ , usó las ecuaciones relativistas de la energía cinética y la cantidad de movimiento, y

conectó con la formulación variacional de la mecánica al estudiar la formulación relativista del principio de mínima acción. Es de destacar su ampliación a las transferencias de calor, las variaciones en la masa inercial de un cuerpo y la generalización de  $E=mc^2$  para cualquier tipo de energía, que fue realizada por Planck en 1908 como *ley de inercia de la energía*.

Minkowski (1864-1909) introdujo una nueva visión del problema con su formulación tetravectorial que unificaba la cantidad de movimiento con la energía total, al considerarla como la cuarta componente del tetravector energía impulso.

Se abría así paso, en el consenso científico, una nueva visión de espacio-tiempo, que seguiría profundizado posteriormente en la Teoría General en la cual el concepto de espacio que surge es indisoluble de la idea de campo. Conforme a la mecánica clásica y la relatividad especial el espacio existe con independencia de la materia o los campos y en él se sitúan estas, por contra la visión de la Teoría General de la Relatividad es la de un espacio que no existe sin relación a la materia o los campos, la propia topología del mismo surge en esta relación.

En la física más actual, en la mecánica cuántica y la relatividad, las dos grandes teorías de la física, el tiempo juega un papel diferente y cabe la posibilidad de que el tiempo aparezca en una futura teoría unificada como una magnitud muy distinta a como ahora se concibe. En el modelo estándar, firmemente asentado en lo experimental, los mecanismos de interacción que atribuyen masa a las partículas manejan conceptos tales como vacíos llenos de un campo que sólo interacciona con las partículas con masa, que reeditan problemas teóricos análogos al viejo éter.

En estos conceptos fundamentales falta contar con una verdadera teoría fundamental, plenamente asentada, que trace el cuadro final; de momento, las modernas teorías de cuerdas que incorporan la gravitación, manejan otras dimensiones temporales asociadas a fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo. Y en cuanto al espacio, proponen espacios de muchas dimensiones que posteriormente se reducen a tres (Yndurain, 1998).

### **Acerca de la posición de Einstein sobre el concepto de masa y la aparición de la llamada masa relativista**

La posición, o mejor dicho las posiciones mantenidas por Einstein, han de ponerse en relación con el contexto científico en que se formularon, por lo que es conveniente seguir un hilo conductor histórico.

Las ideas acerca de la variación de la masa con la velocidad son de origen prerrelativista, en el marco del programa de investigación de la teoría del electrón. Y se atribuían, al igual que la contracción de Lorentz, a procesos físicos que ocurrían en el electrón a alta velocidad con relación al éter. Estas ideas *sonaban* en la mente de los físicos a lo largo del proceso de difusión y depuración de la Teoría de la Relatividad. De hecho la asignación del origen electromagnético a la masa formaba parte de las concepciones de muchos físicos, especialmente alemanes. Se pueden rastrear antecedentes como el cálculo por J. J. Thompson (1856-1940) en 1881 del aumento de masa de un conductor esférico cargado en movimiento rectilíneo, en relación a la

energía del campo electrostático. Poincaré (1854-1912) indicó en 1900 que la energía electromagnética posee una densidad de masa que es igual a la densidad de energía dividida por la velocidad de la luz, etc.

Einstein en su inicial artículo de 1905, estudió el movimiento de un electrón lentamente acelerado que se mueve en un campo electromagnético. Reprodujo las ecuaciones de Lorentz y obtuvo las masas longitudinales y transversales. Se cuida de indicar que estas "masas" son las que surgen de la definición de fuerza y mantener la ecuación en la forma  $F = m \cdot a$ , y señala *"Por supuesto, con una definición diferente de fuerza y aceleración obtendríamos valores diferentes para estas masas"*.

El test experimental vino de la mano del diseño realizado por Thompson en 1897 para la medición de la relación  $q/m$ . Hasta 1910 Kaufman (en 1902-1903) y otros físicos posteriormente, determinaron el valor de  $1.76 \cdot 10^{11}$  C/kg para  $v \ll c$  y exploraron lo que sucedía a velocidades más altas. Al analizar los datos usaron para ello las relaciones clásicas, y llegaron a la conclusión de que la relación  $q/m$  disminuía con la velocidad del electrón y atribuyeron lo que ocurría a *"una variación de la masa con la velocidad"*. De hecho, la teoría de Abraham y Bucherer, competidora con la relativista consideraba que una parte de la masa era de origen electromagnético, debido a una inducción mutua entre sus partes. El refinamiento posterior de las medidas, y fundamentalmente una revisión por Cunningham en 1919, demostró la inexactitud de los mismos, y contrastó experimentalmente lo predicho por la Teoría de la Relatividad. Sin embargo no se evitó cierto contagio de la noción de masa variable.

Einstein, una vez fijado el marco relativista, introdujo la vinculación masa-energía por primera vez en su publicación de 1905: *"¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?"*, pero únicamente en el sentido de la energía equivalente a la masa en reposo. Este concepto es original de Einstein, y se restringía a la pérdida (ganancia) de masa por radiación. El análisis que realiza Einstein de la emisión simultánea de dos ondas electromagnéticas en direcciones opuestas, usando para ello dos sistemas de referencia, le llevan a concluir *"que si un cuerpo pierde la energía  $L$  en forma de radiación, su masa disminuye en  $L/c^2$ "*. Se considera como punto de origen de la ecuación  $E = mc^2$  (Fadner, 1988). El artículo ha sido muy controvertido al achacar cierta circularidad argumental, lo que sin embargo rechazan otros autores (Fadner, 1988).

En 1906 Einstein introdujo la transferencia de masa que conllevaba el intercambio de un fotón lo que implicaba la aceptación de una masa relativista en forma de  $E/c^2$ . Este es el contenido clave del famoso experimento mental (Gedanken) del *"Fotón en una caja"*.

Las ideas de Einstein se iban depurando, la asignación de masa al fotón fue muy fructífera y jugó un papel heurístico de primer orden para el desarrollo de la teoría general de la relatividad, (por ejemplo, efectos gravitatorios de la trayectoria del fotón) (Okun, 1989). Aunque esta idea quedó superada una vez se desarrolló de forma completa la Teoría General, y se incluyeron las consideraciones geométricas y topológicas.

En un artículo menos conocido de 1907 *"La inercia de la energía, como es exigido por el Principio de Relatividad"*, extiende el concepto de inercia de la energía y formula:  $E = \mu_0 (1 - v^2/V^2)^{-1/2}$  -donde  $\mu_0 = E_0/V^2$ - explicitando la energía de la masa en reposo. *"La diferencia esencial entre Einstein y las teorías competidoras es que las formulas de las masas de Einstein son artefactos de la transformación cinemática del espacio y tiempo"* (Adler, 1987). Esta idea es importante en tanto que el comportamiento de partículas a altas velocidades es un hecho experimental que puede analizarse desde la perspectiva de un proceso que ocurre en la partícula o desde la perspectiva de un análisis de espacio y tiempo.

La formulación de la masa relativista en la forma  $m_r = \gamma m_0$  fue realizada en 1911 por Lewis, Tolman y Epstein, así como la formulación inercial para todos los casos de fuerzas y aceleraciones (casos de masas longitudinales y transversales) usando  $F = dp/dt$ , lo que permitió clarificar una proliferación de "masas" (Fadner, 1988). Observemos de paso que esta formulación en un contexto de inicios de la relatividad einsteniana casó con las ideas de masa variable del programa electromagnético. En 1913 Langevin uso  $E = mc^2$  para procesos radiactivos.

Una vez desarrollada la Teoría General el propio Einstein asignó toda esta casuística a la estructura del espacio-tiempo, prescindiendo de conceptos tales como la masa del fotón. El fotón sigue las geodésicas de la topología del nuevo espacio y no cabe usar efectos gravitatorios sobre una supuesta masa.

La posición de Einstein acerca de la masa fue influida muy fuertemente por la formulación tensorial de Minkowski (Adler, 1987), donde el cuadrado del tetravector energía cantidad de movimiento da el invariante  $E^2 - (\mathbf{p}c)^2 = (mc^2)^2$ . En esta ecuación se aprecia que el valor de la energía  $E$  y la cantidad de movimiento  $\mathbf{p}$  dependen del sistema de referencia elegido, pero como son constantes, la masa es invariante en cualquier sistema de referencia. Por otra parte, para un sistema en reposo  $p = 0$ , en consecuencia, la energía en reposo es  $E_0 = mc^2$ , la famosa ecuación de Einstein de equivalencia masa energía. Esta influencia se muestra claramente en su exposición de 1922 *"El significado de la relatividad"* con la teoría ya consolidada (Okun, 1989; Adler, 1987) en que utiliza la masa invariante, utiliza por ejemplo expresiones como:  $E_0 = mc^2$ .

En posteriores ocasiones se reafirma en esta línea. Desaconsejando, incluso de una manera categórica, el uso de la masa dependiente de la velocidad (carta a Barlet en 1948):

*"No es bueno introducir el concepto de masa  $M = m (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  de un cuerpo en movimiento por no ser una definición clara. Es mejor no introducir otro concepto de masa que 'la masa en reposo'  $m$ . En vez de introducir  $M$  es mejor hacer mención a la expresión del momento y la energía de un cuerpo en movimiento"* (Okun, 1989).



## IMPLICACIONES EN LA ENSEÑANZA DE LA RELATIVIDAD

En primer lugar, permite salir al paso de las tergiversaciones que se presentan en la enseñanza de la relatividad. Entre las más comunes podemos señalar:

- comenzar el tema con el experimento "*crucial*" de Michelson y Morley, un tratamiento empirista que omite la situación problemática;
- centrar la creación de la relatividad en la obra genial de un solo hombre, Einstein, según una visión que omite el papel colectivo en la creación científica;
- omitir, o por el contrario sobredimensionar, el carácter de cambio en el paradigma físico. No se puede presentar su nacimiento como un proceso normal, minusvalorando el cambio acelerado que supuso, ni tampoco soslayar la continuidad de fondo. La relatividad supone tanto un cambio como una culminación del programa de investigación clásico.
- afirmar que Einstein introdujo o apoyó la masa relativista

Otros papel que la que la *historia de la ciencia* puede jugar en la enseñanza sería el de contribuir a desarrollar un hilo conductor del tema, ya que permite mostrar la existencia de grandes crisis en el desarrollo de la Física y extraer de dicha historia los problemas significativos. El objetivo relevante de su uso es contribuir a que los conocimientos se estructuren en cuerpos coherentes que puedan sustituir de un modo global la imagen que los estudiantes tienen en este campo, lo que exige el estudio de situaciones problemáticas simplificadas y dirigidas que den sentido al avance y la presencia en el desarrollo de las unidades didácticas de un hilo conductor claro, que sirva de verdadero «organizador de avance» (Solbes y Traver, 1996). Ello ha de incidir en el logro del cambio conceptual, que en sus distintas vertientes, son claves en la didáctica, (p. ej. Montanero y otros, 1996; Oliva, 2001), incluso en el ámbito de la enseñanza de la relatividad (Alemañ y Pérez, 2000). Por otra parte puede contribuir a la motivación de los estudiantes al mostrar el carácter hipotético, tentativo de la ciencia; que es un trabajo de muchas personas, con múltiples implicaciones sociales y culturales (Solbes y Vilches, 1993).

Un hilo conductor como el propuesto, que recoge aportaciones de Sánchez Ron (1988), de Solbes (1986), Gil y Solbes (1993), Pérez y Solbes (2003), podría ser la siguiente.

- I. Se puede comenzar haciendo *emerger ante los alumnos los conceptos de espacio y tiempo* como aspectos importantes del paradigma físico vigente y plantear su cambio a lo largo de la historia de la física.
- II. Estas nociones se conectan de forma inmediata con la consideración de la posible diversidad de estados del observador con relación a este marco espacio-temporal para la descripción de la realidad física y el planteamiento de existencia, o no, de puntos privilegiados para la descripción lo que implica la universalidad de las leyes físicas.
- III. Los puntos planteados conllevan la introducción de la noción de sistema inercial y pasar a formular la pregunta ¿Cómo se relacionan las coordenadas de una partícula medidas en dos sistemas inerciales diferentes?

- IV. Iniciar la respuesta que se da desde la mecánica newtoniana: las transformaciones de Galileo y sus consecuencias (principio de Relatividad de Galileo, ley de transformación de velocidades, aceleraciones). La existencia de este principio de relatividad es un punto clave para resaltar la comunidad de problemas y la presencia de estructuras formales análogas en toda la física: desde la mecánica al electromagnetismo o a la relatividad general.
- V. Una vez estudiada la respuesta clásica debe plantearse al estudiante los aspectos que cuestionan este marco: presentar los problemas que llevaron a pensar que la velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los sistemas inerciales, independientemente del movimiento de la fuente y el observador. El fracaso en la búsqueda de un sistema de referencia en reposo absoluto y las incongruencias entre la teoría electromagnética y el principio de relatividad.

El estudiante *debe participar de la lógica de la construcción de la ciencia* y de la necesidad de un cambio más radical que pusiese en cuestión los fundamentos de la mecánica newtoniana. Plantear como la situación problemática de fines del XIX originó dos líneas de investigación que provocaron la crisis del paradigma clásico y condujeron al establecimiento de la Física relativista y de la Física cuántica. Se debería resaltar el fracaso en el logro de una explicación adecuada y satisfactoria en el marco clásico y entroncarlo con el proceso de elaboración de la ciencia.

Una adecuada comprensión debería incluir esta evolución dinámica de la ciencia, la modificación de la naturaleza de la respuesta (y de la pregunta) a lo largo de la Historia de la Ciencia. Conviene recordar que esta Física clásica se edificó contra la visión que conocemos como "Física del sentido común" y supuso un profundo cambio metodológico. Esta perspectiva ha de cultivarse a lo largo del tema.

De una forma guiada se debe procurar que los alumnos tengan ocasión de conocer el marco problemático e indagar en las variables implicadas en diversas situaciones físicas, o experiencias llevadas a cabo en ese marco histórico y posibilitar al alumno emitir hipótesis propias, extraer conclusiones... La idea básica de algún experimento seleccionado debería ser asequible a los alumnos, por ejemplo las líneas maestras del experimento de Michelson y Morley y los intentos de justificar los resultados dentro del marco de las teorías clásicas, con pequeñas modificaciones de las mismas.

- VI. Enunciar los postulados de la relatividad de Einstein. Se ha guiado al estudiante de forma que aparezca como necesaria una respuesta desde la física que dé salida a la situación problemática. Parece apropiado que los postulados sean introducidos como tales por el profesor y se reserva al alumno una labor de asimilación y exploración de sus consecuencias. Se pretende ahora que estos postulados aparezcan como verosímiles al estudiante y razonar por qué responden al problema. Una comprensión de este aspecto ha de ser más fructífera que el mero manejo de relaciones matemáticas y ha de dar sentido a la respuesta al problema planteado. Eventualmente cabe ayudar a los estudiantes a reflexionar sobre el papel de la simetría en física y el papel que Einstein le atribuyó en la elaboración de la teoría.

- VII. Introducir la contracción del espacio y la dilatación del tiempo como una consecuencia ineludible de los dos postulados. Elaborar la noción de límite clásico. Trazar las líneas más importantes de la nueva dinámica relativista y reafirmar los principios de conservación.
- VIII. Explorar las consecuencias más importantes sobre la noción de energía. Incidir sobre la equivalencia masa/energía. Este es un campo abonado de errores conceptuales, a los que cabe salir al paso. Igualmente se propone utilizar la masa invariante, como opción didáctica más apropiada, conforme se ha fundamentado en el tratamiento histórico y avala la evolución del consenso científico, distinguiendo lo que serían opciones didácticas más o menos discutibles. En todo caso se debería proporcionar a los alumnos criterios para discernir en qué contexto se le está presentando la información por las distintas fuentes.
- IX. Apuntes del principio de equivalencia. Poner de relieve el impacto de la relatividad en el pensamiento contemporáneo. Incidir en las aplicaciones prácticas y las relaciones CTS. Considerar las facetas epistemológicas y las repercusiones en la comunidad científica.

Para los científicos supuso la crisis de muchos supuestos fundamentales. A partir de 1911 Einstein empieza a hablar de relatividad recordando así que los conceptos de espacio y tiempo absolutos de Newton no son válidos y subrayando el cambio que había llevado a cabo. Hubo científicos que efectuaron la transición a la nueva mecánica sin dificultad pero para otros el cambio fue doloroso y no siempre bien asimilado. Una buena comprensión ha de interiorizar la forma en que cambian y se asientan los nuevos conceptos en la comunidad científica.

## **CONCLUSIONES**

Por todo lo expuesto podemos concluir que es útil atender a las aportaciones que puede ofrecer la perspectiva histórica, para la investigación didáctica sobre las ideas de los estudiantes, para favorecer su actitud positiva hacia la ciencia, por cambiar la enseñanza de la ciencia haciéndola más contextualizada en la sociedad y el entorno, más útil y actualizada y mejorar el aprendizaje. Estas aportaciones son coherentes con una enseñanza de la relatividad en la secundaria mediante actividades diseñadas en consonancia con un modelo de enseñanza-aprendizaje, que toma por base el modo de producción de los conocimientos en la ciencia y la forma de construirlos en el aprendizaje (Gil y otros, 1991). Y que pretende producir cambios conceptual, metodológicos y de actitud de los y las estudiantes.

En el caso que nos ocupa, la enseñanza de la relatividad, estas aportaciones de la historia cobran una mayor relevancia por las especiales características de la materia de estudio.

- Por el estatus del tema en el armazón lógico de la disciplina: se manejan conceptos primarios como espacio, tiempo, simultaneidad, masa, etc. Estos conceptos se han presentado al alumno o, posiblemente, se ha esquivado la reflexión acerca de los mismos, en la fundamentación y desarrollo de las

diversas áreas de estudio: mecánica clásica, teoría de campos, óptica, mecánica cuántica etc. Estos conceptos poseen una rica tradición de controversia histórica muy ilustrativa y paralela a concepciones de los propios alumnos.

- Por razones epistemológicas: la génesis de la teoría de la relatividad se presenta como una ocasión de cambio profundo, de modificación del paradigma físico. Permite profundizar en los límites de validez del conocimiento científico y en el carácter lineal, o no, de la acumulación del conocimiento.
- Por la riqueza de las conexiones socioculturales y tecnológicas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, C.G. (1987). Does mass really depend on velocity, dad? *American Journal of Physics*, 55(8), pp. 739-743.
- ALEMAÑ, R.A. y PÉREZ, J.F. (2000). Didáctica de teoría de la relatividad: un caso práctico. *Alambique*, 26, pp.101-112.
- BERKSON, W. (1981). *Las teorías de los campos de fuerza*. Madrid: Alianza Universidad.
- BUNGE, M. (1983). *Controversias en Física*. Tecnos: Madrid.
- CAMPANARIO, J.M. (2000). El desarrollo de la metacognición en el aprendizaje de las ciencias: estrategias para el profesor y actividades orientadas al alumno. *Enseñanza de las ciencias*, 18 (3), pp. 369-380.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D. (1985). La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, 3(2), pp. 113-120.
- CROMBIE, A.C. (1959). *Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo*. Alianza: Madrid.
- DRIVER, R.; GUESNE, E. y TIBERGHIE, A. (1992). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Morata y M.E.C.: Madrid.
- EINSTEIN, A. (1986). *Contribuciones a la ciencia*. Barcelona: Orbis.
- EULER, L. (1985). *Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia*. Alianza: Madrid.
- FADNER, W.L. (1988). Did Einstein really discover " $E=mc^2$ "? *American Journal of Physics*, 56 (2), pp. 114-122.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (1998). Dificultades de aprendizaje de los conceptos de *carga y campo eléctrico* en estudiantes de bachillerato y universidad. *Enseñanza de las ciencias*, 16. (1). pp. 131-146.
- GIL, D. (1993). Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación, *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 11 (2), pp. 197-212.
- GIL, D., CARRASCOSA, J.; FURIÓ, J.M. y TORREGROSA, J.M., (1991). *Las enseñanzas de las ciencias en la educación secundaria*. ICE Horsori: Barcelona.

- GIL, D. y SOLBES, J., (1993). The introduction of modern physics: Overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15 (3), pp. 225-260.
- HOLTON, G. (1979). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Reverté: Barcelona.
- HOLTON, G. (1982). *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*. Madrid : Alianza.
- GLICK, T. H. (1986). *Einstein y los españoles*. Madrid : Alianza.
- IZQUIERDO, M. (1994). Cómo contribuye la historia de las ciencias en las actitudes del alumnado hacia la enseñanza de las ciencias. *Aula de Innovación Educativa*. 27, pp. 37-41.
- KUHN, T.S. (1978). *La revolución copernicana*. Orbis: Barcelona.
- LÓPEZ PIÑERO, J.M. (1982). *La ciencia en la historia hispánica*. Barcelona: Salvat.
- MARTÍN, J. y SOLBES, J. (1991). Análisis de la introducción del concepto de campo, *Revista Española de Física*, 5 (3), pp 34-39.
- MATTHEWS, M. R., 1990. History, Philosophy and Science: A Rapprochement. *Studies in Science Education*, 18, pp. 25-51.
- MCDERMOTT, L.C. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics Today*, 7, pp. 24-34.
- MONTANERO, M.; SUERO, M.I.; PÉREZ, A.L. y MONTANERO, M. (1996). El quien-que-cual de las fuerzas. Una tecnica para la resolucion de problemas que procura el cambio conceptual. *Alambique: Didactica de las Ciencias Experimentales*, 7; pp. 97-107.
- NEWTON, I. (1972). *Selección*. Austral, Espasa Calpe: Madrid.
- OKUN, L.B. (1989). The concept of mass. *Physics Today*, Vol. 42, pp. 31-36.
- OLIVA, J.M.. (2001). Distintos niveles de análisis para el estudio del cambio conceptual en el dominio de la mecánica. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(1), pp. 89-102.
- PÉREZ, H. y SOLBES, J. (2003). Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, 21(1), pp. 135-146.
- RUSSELL, B. (1983). *El conocimiento humano*. Orbis: Barcelona.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (2), pp.137-144.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1985). *El origen y el desarrollo de la relatividad*. Alianza: Madrid.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1988). Usos y abusos de la historia de la Física en la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), pp. 179-188.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1999). *Cinzel, martillo y piedra*. Madrid: Taurus.
- SELLERI, F. (1997). El principio de relatividad y la naturaleza del tiempo. *Revista Española de Física*, 11(3). pp. 37- 42.
- SOLBES, J. (1986). *La introducción de los conceptos básicos de física moderna*. Tesis doctoral. Universitat de València.

- SOLBES, J. (1999). Los valores en la enseñanza de las ciencias. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales Alambique*, 22, pp. 97-108.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp. 103-112.
- SOLBES, J. y TRAVER, M. (2003). Against negative image of science: history of science in the physics & chemistry Education, *Science & Education*, 12, pp. 703-717.
- SOLBES, J. y VILCHES, A. (1997): STS interactions and the teaching of physics and chemistry. *Science Education*, 81 (4), pp. 377-386.
- TRUEDELL, C. (1975). *Ensayos de Historia de la Mecánica*. Tecnos: Madrid.
- YNDURAIN, F. (1998). Espacio, tiempo, Materia. *Revista española de Física*, 12(2) pp. 14-19.

### **SUMMARY**

*The relativity is an important part the modern physics. In this article we analyze the discussion around the use of the history of science to guide the didactics of the relativity in the secondary education. It is reviewed the historical evolution of some key concepts of the special relativity and it is shown its implication in the teaching and learning.*

**Key words:** *teaching and learning, relativity, history of science.*